



PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales BüroINTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)(51) Internationale Patentklassifikation⁶ :

E01C 19/28

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 98/17865

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum:

30. April 1998 (30.04.98)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/CH97/00396

(22) Internationales Anmeldedatum: 21. Oktober 1997 (21.10.97)

(30) Prioritätsdaten:
2559/96 21. Oktober 1996 (21.10.96) CH(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): AM-
MANN VERDICHUNG AG [CH/CH]; Eisenbahnstrasse
25, CH-4900 Langenthal (CH).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): ANDEREGG, Roland
[CH/CH]; Im Kleinholz 67, CH-4600 Olten (CH).
LEIBUNDGUT, Hans, Ulrich [CH/CH]; Eichenweg 9,
CH-3128 Kirchenthurnen (CH).(74) Anwalt: KELLER & PARTNER PATENTANWÄLTE AG;
Zeughausgasse 5, Postfach, CH-3000 Bern 7 (CH).(81) Bestimmungsstaaten: JP, US, europäisches Patent (AT, BE,
CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL,
PT, SE).

Veröffentlicht

Mit internationalem Recherchenbericht.

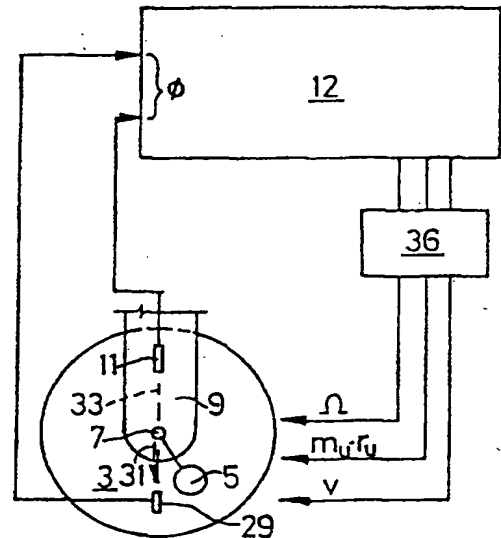
(54) Title: METHOD OF MEASURING MECHANICAL DATA OF A SOIL, AND OF COMPACTING THE SOIL, AND MEASURING
OR SOIL-COMPACTION DEVICE(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR MESSUNG MECHANISCHER DATEN EINES BODENS SOWIE ZU DESSEN VERDICH-
TUNG UND MESS- BZW. BODENVERDICHTUNGSVORRICHTUNG

(57) Abstract

In this method for achieving optimum, in particular homogeneous, soil compaction, a compaction device (3) acting upon the soil to be compacted, whose oscillations are registered together with those of the soil as a single compaction vibration system by a computing unit (12), is excited by an oscillation-inducing force in such a way that this compaction vibration system oscillates in resonance, or at a frequency (Ω) that exceeds the resonance value by a specified frequency value that is only determined by adjustment stabilities. The value of the oscillation-inducing force, its periodic frequency (Ω), and the phase angle (ϕ) to the oscillation of the compaction vibration system are set automatically by the computing unit (12) so that a specified soil rigidity is achieved, taking into account the mass of the compaction device (3) and of the weight pressing on it statically. The compaction device according to the invention can also be used to determine the soil rigidity and/or the soil modulus of elasticity.

(57) Zusammenfassung

Bei dem Verfahren zum Erreichen einer optimalen, insbesondere homogenen Bodenverdichtung wird eine auf den zu verdichtenden Boden einwirkende Verdichtungseinrichtung (3), welche zusammen mit dem Boden schwingungsmäßig als ein einziges Verdichtungsschwingungssystem von einer Recheneinheit (12) erfaßt wird, durch eine schwingungsanregende Kraft derart angeregt, daß dieses Verdichtungsschwingungssystem in Resonanz schwingt oder mit einer die Resonanz um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellungsstabilitäten bestimmten Frequenzwert überschreitenden Frequenz (Ω) schwingt. Der Wert der schwingungsanregenden Kraft, deren periodische Frequenz (Ω) und deren Phasenwinkel (ϕ) zur Schwingung des Verdichtungsschwingungssystems werden selbsttätig von der Recheneinheit (12) derart eingestellt, daß unter Berücksichtigung der Masse der Verdichtungseinrichtung (3) und des auf ihr statisch lastenden Gewichts eine vorgegebene Bodensteifigkeit erreicht wird. Die erfindungsgemäße Verdichtungseinrichtung kann auch zur Bestimmung der Bodensteifigkeit und/oder des Elastizitätsmoduls des Bodens verwendet werden.



5

10

15

Verfahren zur Messung mechanischer Daten eines Bodens sowie
zu dessen Verdichtung und Meß- bzw.
Bodenverdichtungsrichtung

20

25

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung mechanischer Daten eines verdichteten oder zu verdichtenden Bodens, ein Verdichtungsverfahren zum Erreichen einer optimalen, insbesondere homogenen Bodenverdichtung, eine Meßvorrichtung zur Messung mechanischer Daten eines verdichteten oder zu verdichtenden Bodens sowie eine Bodenverdichtungsrichtung zur optimalen homogenen Bodenverdichtung.

30

Aus der WO 95/10664 ist ein Verfahren zur Bodenverdichtung bekannt. Bei dem bekannten Verfahren wird die Frequenz einer rotierenden Unwucht derart eingestellt, daß die mit dem zu verdichtenden Boden sich im Kontakt befindende Verdichtungseinheit einen vorgegebenen Wert an Oberschwingungen

35

- hier die doppelte Grundschiwingung - nicht überschreitet. Die Unterschreitung dieses vorgegebenen Werts wird als Stabilitätskriterium betrachtet. Unter Verwendung zweier senkrecht zueinander angeordneter Beschleunigungsaufnehmer an

der Verdichtungseinheit wird deren Beschleunigung gemessen. Einer der Beschleunigungsmesser mißt die horizontale und der andere die vertikale Beschleunigungskomponente. Es wird die Schwingungsamplitude der Verdichtungseinrichtung sowie die
5 Richtung der maximalen Verdichtungsamplitude bestimmt. Die Frequenz des Exzenter und dessen Gewicht sowie die Rollgeschwindigkeit sind computergestützt einstellbar. Sie werden jedoch derart eingestellt, daß eine Maschinenresonanz und eine Resonanz des Gestells vermieden werden. Die Frequenz-
10 und Gewichtseinstellung des Exzenter erfolgt ohne Berücksichtigung des zu verdichtenden Bodens. Aus den gemessenen Beschleunigungswerten wird der Schermodul des verdichteten Bodens und dessen plastischer Parameter bestimmt.

15 Aus der EP-A 0 459 062 ist ein weiteres Bodenverdichtungsverfahren bekannt. Bei dem bekannten Verdichtungsverfahren wird das Augenmerk darauf gerichtet, daß die Maschinenparameter derart eingestellt werden, daß vorgegebene Kräfte gegen den zu verdichtenden Boden erreicht werden.

20

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Meß- bzw. Bodenverdichtungsverfahren aufzuzeigen und eine Meß- bzw. Bodenverdichtungs-
25 vorrichtung zu schaffen, mit dem bzw. mit der eine homogene Bodenverdichtung in einem Verdichtungsverfahren mit möglichst wenig Überfahrten, insbesondere unter Vorgabe einer gewünschten Bodensteifigkeit und/oder insbesondere eines gewünschten Elastizitätsmoduls erreichbar ist sowie mechanische Daten des zu verdichtenden bzw. verdichteten Bodens bestimmbar sind.

30

Die Aufgabe wird dadurch gelöst, daß im Gegensatz zur oben zitierten WO 95/10664 nicht auf die örtliche Phasenlage einer maximalen Schwingungsamplitude einer Verdichtungs-
35 bzw. Meßvorrichtung abgestellt wird, sondern auf die zeitliche Phase der anregenden Schwingung des bzw. der Exzenter zur Phase der angeregten Schwingung des Bodenverdichtungs- bzw. Meßsystems, welche identisch mit derjenigen der Verdichtungs- bzw. Meßeinrichtung ist. Auch wird im Gegensatz

zur WO 95/10664 im Resonanzbereich eines Schwingungssystems, gebildet aus der auf den zu verdichtenden (bzw. bereits verdichteten) Boden einwirkenden Verdichtungs- bzw. Meßeinrichtung und dem Boden, gearbeitet. Die bekannte Bodenverdichtungs-
5 tungs- vorrichtung der EP-A 0 459 062 arbeitet zwar im Resonanzbereich ihrer Verdichtungseinrichtung, es ist ihr aber nicht möglich, die durch die Verdichtung erreichte Bodensteifigkeit c_B zu ermitteln und den gesamten Verdichtungs-
vorgang aufgrund dieser ermittelten Werte zu optimieren.

10

Zur Erläuterung der Erfindung wird in den nachfolgenden Figuren eine erfindungsgemäße Bodenverdichtungs-
vorrichtung beschrieben. Die Bodenverdichtungs-
vorrichtung beinhaltet eine erfindungsgemäße Meß-
15 vorrichtung zur Bestimmung der für eine Verdichtung wesentlichen mechanischen Daten. Es zeigen

20

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Doppeltandemvibrationswalze mit Knicklenkung, mit der die erfindungsgemäße Bodenverdichtung durchführbar ist,

Fig. 2 ein schwingungsmäßiges, mechanisches Ersatzschaltbild der Bodenverdichtungs-
vorrichtung aus Figur 1,

25

Fig. 3 ein signalmäßiges Blockschaltbild zur Durchführung der erfindungsgemäßen Bodenverdichtung,

30

Fig. 4 eine normierte Schwingungsamplitude der Bodenverdichtungseinrichtung (Ordinate) gemäß Figur 2 in Abhängigkeit einer normierten Schwingungsfrequenz der die Schwingung anregenden Unwucht (Abszisse),

Fig. 5 die Lage eines im Boden zu verdichtenden Bodenelements,

35 Fig. 6 eine auf das in Figur 5 gezeigte Bodenelement einwirkende Verdichtungskraft,

Fig. 7 einen Einschaltvorgang einer Bodenverdichtungsein-

richtung zum Erreichen eines optimalen Betriebspunktes in einer Darstellung analog zu derjenigen in Figur 4 und

- 5 Fig. 8 eine schematische Darstellung eines Getriebes für den Antrieb zweier Unwuchten der Bodenverdichtungseinrichtung mit einstellbarem Trägheitsmoment.

10 Die in Figur 1 dargestellte Doppeltandemvibrationswalze 1 mit Knicklenkung hat eine vordere und eine hintere Bandage 3a und 3b als Bodenverdichtungseinrichtung. In den nachfolgenden Betrachtungen wird jeweils nur eine der beiden Bandagen 3a bzw. 3b betrachtet, welche, sofern kein Unterschied zwischen vorderer und hinterer Bandage 3a und 3b besteht, mit der Bezugszahl 3 bezeichnet wird. Eine Kopplung zwischen den beiden Bandagen 3a und 3b bei der hier beispielsweise beschriebenen Doppeltandemvibrationswalze 1 ist für das Betriebsverhalten zu vernachlässigen.

20

Die Bandage 3 hat, wie schematisch in den Figuren 2 und 3 dargestellt ist, eine rotierende Unwucht 5 mit einstellbarem statischen Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$. Das Unwuchtmoment wird über eine Veränderung des radialen Unwuchtabstands r_u der Unwucht 5 eingestellt. Die Einstellung des Trägheitsmoments und der Frequenz f ist unten beschrieben. Zur Vereinfachung der nachfolgenden Ausführung sei die Masse m_u der Unwucht punktförmig in einem Abstand r_u von der Drehachse 7 der Bandage 3 rotierend angeordnet. Das statische Unwuchtmoment ist, somit $m_u \cdot r_u$ [kg·m]. Vertikal über der Drehachse 7 an der Seite einer Trägerlasche 9 der Bandagenhaltegebel 10 ist ein Beschleunigungsaufnehmer 11 vorhanden. Mit dem Beschleunigungsaufnehmer 11 sind Beschleunigungswerte der Bandage 3 in vertikaler Richtung meßbar. Der Beschleunigungsaufnehmer 11 ist mit einer Recheneinheit 12 signalmäßig verbunden, welche durch zweimalige Integration die Schwingungsamplitude a der Bandage 3 ermittelt. Die Bandagenhaltegebel 10 ist über Feder- und Dämpfungselemente 13 und 14 mit dem Maschinenchas-

25
30
35

sis 15 verbunden. Feder- und Dämpfungselemente 13 und 14 sind derart ausgebildet, daß im Dämpfungselement 14 die dynamischen Kräfte bedeutend kleiner sind als die statischen.

5 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Erreichen einer optimalen, insbesondere einer homogenen Bodenverdichtung wird die Bewegung bzw. die Beschleunigung der Bandage 3, wie oben bereits angedeutet, mit dem Beschleunigungsaufnehmer 11 gemessen. Mathematisch kann die durch die Unwucht 5 angeregte
10 te schwingende Bewegung der Bandage 3 wie folgt in der nachfolgenden Gleichung [1] dargestellt werden:

$$x_d(t) = a_{1/2} \cos[(\Omega/2)t + \delta_{1/2}] + a_1 \cos[\Omega t + \delta_1] + a_{3/2} \cos[(3\Omega/2)t + \delta_{3/2}] +$$

15 $a_2 \cos[2\Omega t + \delta_2] + a_{5/2} \cos[(5\Omega/2)t + \delta_{5/2}] + a_3 \cos[3\Omega t + \delta_3]$

In dieser Formel gibt der Index 1 eine Zuordnung zu Werten an, welche dieselbe Kreisfrequenz Ω ($\Omega = 2\pi f$, wobei f die Frequenz der Unwucht 5 ist) aufweisen, wie die anregende
20 Schwingung der Unwucht 5. $1/2$ bezieht sich auf die halbe Kreisfrequenz Ω , $3/2$ auf die anderthalbfache und $5/2$ auf die zweieinhalbfache Kreisfrequenz Ω . a ist der maximale Amplitudenwert der betreffenden Teilschwingung. δ bezeichnet die phasenmäßigen Zuordnungen der Teilschwingungen zueinander.

25

Aus dem Beschleunigungssignal können in der Recheneinheit 12 mittels einer Fourieranalyse gemäß obiger Gleichung die Frequenzanteile ermittelt werden. Je nach gefordertem Verdichtungsverfahren wird nun das statische Unwuchtmoment der
30 Unwucht 5 und deren Frequenz f unterschiedlich eingestellt:

a) Verbleibt die Bandage 3 immer in Bodenkontakt, so wird mittels Fourieranalyse im wesentlichen lediglich die Umlauffrequenz $1 \cdot f$ der Bandage ermittelt. Diesen Verdichtungsverfahren nennt man Auflastbetrieb.

35

b) Hebt die Bandage 3 periodisch von Boden ab, was gegenüber a) eine stärkere Verdichtung ergibt, so werden mit der Fourieranalyse Oberschwingungen festgestellt, also

Kreisfrequenzen von 2Ω , 3Ω , ... mit stark abnehmender maximaler Amplitude. Das Abheben der Bandage 3 vom Boden kennzeichnet einen optimalen Betriebszustand, da hier die auf den Boden übertragenen Kräfte größer sind als im Fall a), wodurch eine stärkere Verdichtung erfolgt.)

c) Fängt die Maschine d.h. die ganze Walze 1 zu springen an, d.h. das Maschinenchassis 15 fängt an, Schwingungen um seine Ruhelage herum auszuführen, dann treten zu den Oberwellen auch Schwingungen mit der halben Anregungskreisfrequenz Ω der Unwucht 5 auf, also zusätzlich $(1/2)\Omega$, $(3/2)\Omega$, $(5/2)\Omega$, ... Dieser Zustand ist instabil und kann zudem den Untergrund wieder auflockern. Ferner kann hier das Maschinenchassis 15 anfangen, um seine Längsachse zu schwingen.

Gemäß dem mechanischen Ersatzschaltbild der Figur 2 wird der zu verdichtende Boden 20 als eine Feder 17 und ein Dämpfungselement 19 dargestellt. D.h. ein Bodenverdichtungssystem, welches die Bandage 3 mit schwingungsanregender Unwucht 5, das Federelement 17 und das Dämpfungselement 19 des zu verdichtenden Bodens 20 sowie das Federelement 13 und das Dämpfungselement 14 zwischen Bandage 3 und Maschinenchassis 15 enthält, weist eine Eigenschwingung auf. Daß dem so ist, ergibt sich aus den in Figur 4 gezeigten Meßkurven. Auf der Abszisse ist die Schwingungskreisfrequenz Ω der Bandage 3 und auf der Ordinate die gemessene maximale Schwingungsamplitude a aufgetragen. Die Schwingungskreisfrequenz Ω ist jedoch auf die Eigenfrequenz ω_0 des Bodenverdichtungssystems und der Wert a auf einen Wert a_0 normiert. Kurvenparameter ist das statische Unwuchtmoment [Produkt aus einer punktförmig angeordnet gedachten Unwuchtmasse m_u und dem radialen Abstand r_u von der Achse 7]. Das Unwuchtmoment der Kurve 21a ist kleiner als das der Kurve 21b, usw. Oberhalb der Kurve 23 beginnt die Walze 1 zu springen [Fall c]. Die Kurve 23 darf deshalb im Verdichtungsbetrieb nicht überschritten werden. Die Schar der Resonanzkurven 21a bis 21d

stellt eine wesentliche Identifikationsgröße des Betriebs-
verhaltens des Bodenverdichtungssystems dar. Aus ihr lassen
sich, wie unten ausgeführt wird, die verschiedenen Einflüsse
der Maschinenparameter und der grundsätzliche Verlauf des
5 Verdichtungsprozesses ablesen. Eine Verdichtung ist jeweils
bei Resonanz des Bodenverdichtungssystems, gebildet aus der
auf den zu verdichtenden Boden 20 einwirkenden Verdichtungs-
einrichtung und dem zu verdichtenden Boden 20, optimal, d.h.
am schnellsten und unter geringstem Energieaufwand vollzieh-
10 bar.

Die Eigenfrequenz w_0 des Bodenverdichtungssystems ist
die Quadratwurzel aus den Quotienten der Bodensteifigkeit
 c_B [MN/m] und dem Gewicht m_d [kg] der Bandage 5:

15

$$w_0 = (c_B/m_d)^{1/2}$$

In obiger Gleichung sind dem Gewicht der Bandage 5 An-
teile der jeweiligen Radabstützung sowie rechnerische "Boden-
20 teile" hinzuzufügen. Diese Zusatzanteile liegen jedoch le-
diglich bei maximal 10% des reinen Bandagengewichts. Sie
werden bevorzugt experimentell bestimmt und können in erster
Näherung vernachlässigt werden. Die Bodensteifigkeit c_B
liegt in der Regel zwischen 20 MN/m und 130 MN/m. Sie wird
25 erfindungsgemäß, wie unten beschrieben, ermittelt. Die Ei-
genfrequenz w_0 wird am einfachsten durch Überfahren des Bo-
dens 20 mit einem kleinen statischen Unwuchtmoment gemäß
Kurve 21a gemessen. Die Frequenz der Unwucht 5 beim maxima-
len Kurvenwert 25 von a/a_0 gibt die Eigenfrequenz w_0 an. Der
30 normierte Amplitudenwert von $a/a_0 = 1$ ist dort, wo die die
Maximalwerte der Kurven 21a bis 21d verbindende Kurve 27 be-
ginnt nach links abzuknicken. Der Amplitudenwert a_0 ergibt
sich näherungsweise aus der Formel

35

$$a_0 = (m_f + m_d)g/c_B \quad [2]$$

unter der Voraussetzung, daß die Bandage 3 nicht abhebt

(Fall b), was hier jedoch gegeben ist. m_f ist die Auflast des Maschinenchassis 15 pro Bandage 3. g ist die Erdbeschleunigung mit $g \approx 10$.

5 Neben dem Beschleunigungsaufnehmer 11 ist ortsfest zur Trägerlasche 9 ein Lagesensor 29 zur zeitlichen Bestimmung der rotierenden Unwucht 5 durch ihren vertikalen Tiefstpunkt (= Verdichtungsrichtung) angeordnet. Dieser Durchgang ist identisch mit dem Zeitpunkt der maximalen gegen den Boden 20 gerichteten Unwuchtkraft. Die maximale gegen den Boden 20 wirkende Kraft wird von der Bandage 3 in den Boden 20 übertragen und erfolgt mit einer Phasenverschiebung um den Winkel ϕ . D.h. die Phasenverschiebung ϕ gibt die Lage der anregenden Schwingung durch die Unwucht 5 zur Schwingung des Bodenverdichtungssystems wieder.

Eine maximale Verdichtungskraft im Boden 20 wird bei Resonanz des Bodenverdichtungssystems erreicht. Resonanz des Bodenverdichtungssystems erfolgt immer bei maximalen Werten der Kurven 21a bis 21d, welche auf der Kurve 27 liegen. Bei Resonanz ist eine Phasenverschiebung des anregenden Schwingungssystems durch die Unwucht 5 zum Bodenverdichtungssystem von $\phi = 90^\circ$ gegeben. D.h. eine optimale Verdichtung ist mit Walzenparametern [statisches Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ und Unwuchtumlaufkreisfrequenz Ω] gegeben, welche einen Betrieb auf der Kurve 27 ermöglichen. Die Resonanzkurven 21a bis 21d in Figur 4 sind nun bei konstanten Bodeneigenschaften aufgenommen. Die Bodeneigenschaften, repräsentiert ersatzweise durch das Federelement 17 und das Dämpfungselement 19 in Figur 2, können sich ändern und damit auch die Lage der Resonanzkurven 21a bis 21d. Wie aus der Darstellung in Figur 4 ersichtlich ist, ändert sich die für die Verdichtung des Bodens 20 verantwortliche Schwingungsamplitude im unterresonanten Bereich [Schwingungskreisfrequenz Ω ist kleiner als die Resonanzfrequenz, Phasenwinkel ϕ ist kleiner als 90°] sehr stark; im überresonanten Bereich [Schwingungskreisfrequenz Ω ist größer als die Resonanzfrequenz, Phasenwinkel ϕ ist größer als 90°] dagegen verhältnismäßig wenig. Für einen stabili-

Manent

len Verdichtungsbetrieb wählt man somit den überresonanten Bereich und stellt den Phasenwinkel ϕ auf einen Bereich zwischen 95° und 110° , bevorzugt 100° ein.

5 Die Einstellung des Phasenwinkels ϕ erfolgt bei vorgegebenem statischen Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ durch eine Reduktion der Umdrehungskreisfrequenz Ω der Unwucht 5. Man läuft beispielsweise auf der Resonanzkurve 21d in Richtung des Pfeiles 35. Der Bereich des Walzenspringens, gekennzeichnet
10 durch den Bereich oberhalb der Kurve 23, muß selbstverständlich vermieden werden. Ein Eindringen in diesen Bereich wird gefühlsmäßig vom Walzenführer durch ein anderes Schwingungsverhalten seiner Walze 1 wahrgenommen. Meßtechnisch treten
15 jedoch, wie bereits oben aufgeführt, Schwingungen mit der halben Frequenz [und ungeraden Vielfachen] der Umlaufkreisfrequenz Ω der Unwucht 5 auf. Dieser unstabile [springende] Betrieb kann aber auch dadurch festgestellt werden, daß aufeinanderfolgende Schwingungsamplituden der Bandage 3 unterschiedlich hoch sind.

20

Zum Erreichen der maximal möglichen Verdichtungsleistung muß die Verdichtungsamplitude der Bandage 3 so groß wie möglich gewählt werden. Für das Erreichen eines vorgegebenen Bodenelastizitätsmoduls E bzw. einer vorgegebenen Bodensteifigkeit c_B wird von der Recheneinheit 12 und einem Stellgeber 36 selbsttätig die benötigte Amplitude eingestellt, wie
25 unten ausgeführt wird.

Auch die Verfahrensgeschwindigkeit v der Walze 1 wird auf
30 eine gleichmäßige Verdichtungsarbeit pro Wegeinheit trotz variabler Umlaufkreisfrequenz Ω der Unwucht 5 eingestellt. Der Geschwindigkeitssollwert ist von der Art der zu verdichtenden Schicht abhängig. Eine ungebundene Schicht erfordert infolge einer tiefen Umlaufkreisfrequenz Ω eine kleinere
35 Verfahrensgeschwindigkeit v als eine gebundene Schicht. Beispielsweise wird auf einer ungebundenen Schicht mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von $v_u = 3$ km/h mit einer Umlauffrequenz $f_u = 30$ Hz und auf einer gebundenen Schicht mit einer

Verfahrensgeschwindigkeit von $v_g = 4,5 \text{ km/h}$ mit einer Umlauffrequenz $f_g = 45 \text{ Hz}$ gefahren.

Ein Bodenelement 37, wie in Figur 5 dargestellt, in einer Tiefe z_0 "sieht" beim Verdichtungsvorgang eine mit einer Geschwindigkeit v vorbeifahrende zweibandagige Walze 1. Je nach Ortslage der beiden über das Bodenelement 37 hinwegrollenden Bandagen 3a und 3b sieht dieses gemäß Figur 6 eine andere Belastungsspitze 39. Die beiden Belastungsverläufe für die beiden Bandagen 3a und 3b, wobei der Pulszug 40a von der Bandage 3a und der Pulszug 40b von der Bandage 3b herühren, können linear superponiert werden. Ihre Wirkung addiert sich. Je nach Schwingungsamplitude a des Bodenverdichtungssystems, des Achsabstands d der beiden Bandagen 3a und 3b sowie der Tiefe z_0 des betrachteten Bodenelements 37 kann sich eine Überlappungszone 41 ausbilden, in welcher von beiden Bandagen 3a und 3b Belastungsanteile auf das Bodenelement 37 einwirken. Der zeitliche Abstand t_g der auf das Bodenelement 37 wirkenden Belastungsanteile sollte im Betrieb konstant gehalten werden, um immer dieselbe Verdichtungsgüte zu erreichen. Wie aus den untenstehenden Ausführungen hervorgeht, wird die erfindungsgemäß geregelte Walze 1 bei zunehmender Bodensteifigkeit c_B mit einer höheren Umlauffrequenz Ω betrieben, was dann eine erhöhte Verfahrensgeschwindigkeit v nach sich zieht. D.h. die Verdichtung geht immer schneller vonstatten.

Im Gegensatz zu bekannten Walzen und bekannten Verdichtungsverfahren (z.B. WO 95/10664) wird nun nicht mehr nur auf einen konstanten Schermodul, sondern auf eine vorgegebene, bevorzugt konstante Bodensteifigkeit c_B sowie, falls notwendig, auf einen vorgegebenen, konstanten Elastizitätsmodul E verdichtet. Bei den bisherigen Walzen und Verdichtungsmaschinen wurde immer davon ausgegangen, wenigstens eine minimale Verdichtung, definiert durch die Bodensteifigkeit c_B bzw. den Bodenelelastizitätsmodul E , zu erreichen. Die aus den bekannten Verfahren resultierenden großen Unterschiede zwischen minimaler und maximaler Verdichtung führen

zum bekannten, jedoch unerwünschten unregelmäßigen Absinken und Unebenwerden beispielsweise von Straßenoberflächen. Diese Unterschiede werden durch Erfindung vermieden.

5 Im Gegensatz hierzu wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren u.a. auf einen konstanten Elastizitätsmodul E verdichtet. Ein konstanter Bodenelastizitätsmodul E ergibt im Gegensatz zu den bekannten, auf minimale Bodensteifigkeit verdichteten Böden eine bedeutend größere Langzeitstabilität. Wobei hier noch einmal hervorgekehrt wird, daß nicht nur auf eine vorgegebene Bodensteifigkeit c_B , sondern auch auf einen vorgegebenen Bodenelastizitätsmodul E verdichtet wird. Beispielsweise wird ein auf konstanten Bodenelastizitätsmodul verdichteter Boden 20 eines Straßenbauwerks sich im Verlauf seiner Alterung durch die Verkehrsbeanspruchung gleichmäßig absenken und somit seine Ebenheit sehr viel länger behalten als ein nach dem Stand der Technik verdichteter. Nach den bekannten Verfahren verdichtete Straßenbauwerke werden im Laufe der Zeit infolge inhomogener Verdichtung 20 uneben, reißen oberflächlich und sind dann der Zerstörung durch Verkehr und Witterungseinflüsse preisgegeben.

Der Bodenelastizitätsmodul E wird erfindungsgemäß laufend mit der Walze 1 ermittelt und die Maschinenparameter laufend nachgestellt, wobei hier darauf zu achten ist, daß im Boden keine Mulden verbleiben, d.h. die Bodenoberfläche 42 bereits gut verdichtet ist. Der exakte Bodenelastizitätsmodul E interessiert in der Praxis erst beim Ende des Verdichtungsvorgangs. Zu diesem Zeitpunkt ist die Bodenoberfläche (42) jedoch bereits ausreichend verdichtet. Der Bodenelastizitätsmodul E ergibt sich aus nachstehender Formel [3].

$$35 \quad E = c_B \cdot \frac{2(1-\mu^2)}{L \cdot \pi} \cdot \left\{ 1,89 + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\pi \cdot L^3 \cdot E}{16(1-\mu^2)(m_f + m_d) \cdot g \cdot R} \right] \right\} \quad [3]$$

Diese Gleichung ergibt sich aus einer postulierten kontinuumsmechanischen Betrachtung eines gekrümmten Körpers, welcher sich in Kontakt mit einem elastischen, halbunendli-

chen Raum befindet.

Da der interessierende Wert des Bodenelastizitätsmoduls E auf beiden Seiten der obigen Gleichung auftritt, muß sein Wert mit einer einfachen Iteration bestimmt werden. Für
5 einen Berechnungsbeginn wird in den rechtsseitigen Gleichungswert für E

$$E \text{ [MN/m}^2\text{]} = 2,3 \text{ [1/m]} \cdot c_B \text{ [MN/m]} \quad [4]$$

10 eingesetzt. Die Bodensteifigkeit c_B wird mit den untenstehenden Formeln von der Recheneinheit 12 ermittelt, da ihr alle Werte bekannt sind bzw. von ihr eingestellt werden.

Im Auflastbetrieb [Fall a)], d. h. es erfolgt kein Abheben der Bandage 3 (dieser Betriebszustand ist bis zu Amplituden $a/a_0 = 1$ gegeben), wird die Bodensteifigkeit c_B von
15 der Recheneinheit 12 mit der Formel

$$20 \quad c_B = \Omega^2 \cdot \left[m_d + \frac{m_u \cdot r_u \cdot \cos(\phi)}{a} \right] \quad [5]$$

ermittelt.

25 Erfolgt ein Abheben der Bandage 3, was die Recheneinheit 12 durch das Auftreten von Kreisfrequenzen mit 2Ω , 3Ω , ... registriert, so berechnet sie die Bodensteifigkeit c_B mit der Formel

$$30 \quad c_B = \frac{F \text{ (bei } \ddot{a}=0\text{)}}{[1 - \cos(\pi^2/2K)] \cdot a} \quad [6]$$

wobei

$$35 \quad F = -m_d \cdot \ddot{a} + m_u \cdot r_u \cdot \Omega^2 \cdot \cos\phi + (m_f + m_d) \cdot g \quad [7]$$

und

$$K = \frac{F_{\max}}{(m_f + m_d) \cdot g}$$

[8]

5

5 \dot{a} wird durch Integration des mit dem Beschleunigungsauf-
 nehmer 11 gemessenen Werts erhalten. \dot{a} ist die vertikale Ge-
 schwindigkeit der Bandage 5. Es handelt sich hier um die
 zeitlich sich ändernde Bandagengeschwindigkeit, welche je-
 10 doch nicht mit der Verfahrensgeschwindigkeit v zu verwechseln
 ist. $\dot{a}=0$, d.h. eine Geschwindigkeit Null der Bandage 5 wird
 immer im oberen und unteren Schwingungsumkehrpunkt erreicht.
 \ddot{a} ist der mit dem Beschleunigungsaufnehmer 11 ermittelte
 Wert. Das statische Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ [kg m] in der obigen
 15 Formel ist aus den Daten der Unwucht 5 bestimmbar. Die Er-
 mittlung des Phasenwinkels ϕ ist oben bereits beschrieben
 worden. m_d [kg] ist als Gewicht der betreffenden Bandage 3
 bekannt. Ω wird als Rotationskreisfrequenz der Bandage 3
 eingestellt und ist somit bekannt. Die maximale Schwingungs-
 20 auslenkung a der Bandage 3 ist ebenfalls bestimmbar.

In Formel [3] wird die Querkontraktionszahl des Unter-
 grounds mit $\mu = 0,25$ (sie liegt zwischen 0,20 und 0,30) ange-
 setzt. L [m] ist die Breite der Bandage 3, $(m_f + m_d)$ das auf
 25 jeder Bandage 3a bzw. 3b lastende Gewicht plus das Gewicht
 der betreffenden Bandage 3a bzw. 3b, R [m] ist der Radius
 der Bandage 3, g [= 10 m/s²] die Erdbeschleunigung und \ln
 der natürliche Logarithmus. Es sind somit sämtliche Werte
 zur selbsttätigen Bestimmung der Bodensteifigkeit c_B bekannt
 30 bzw. können von der Recheneinheit 12 bestimmt werden, womit
 auch der Elastizitätsmodul E mit der Recheneinheit 12 ermit-
 telbar ist.

Zur Ableitung der obigen Formel [3] geht man von der Be-
 35 rührung zweier elastischer Rollen aus. Die erste Rolle hat
 einen Elastizitätsmodul E_1 , einen Radius R_1 und eine Quer-
 kontraktionszahl μ_1 . Die zweite Rolle hat einen Elastizi-
 tätsmodul E_2 , einen Radius R_2 und eine Querkontraktions-
 zahl μ_2 . Beide Rollen haben die Länge L . Für den Flächen-

druck p [N/m^2] zwischen beiden Rollen ergibt sich dann

$$p = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot b} \cdot [1 - (4 \cdot y^2)/b^2]^{1/2} \quad [10]$$

wobei P die auf die erste Rolle wirkende Kraft ist, b die Breite der Berührungsfläche ($L \cdot b$) ist, über die sich die beiden Rollen infolge elastischer Verformung berühren und y die laufende Koordinate senkrecht zur Rollennachse mit dem Nullpunkt auf der Rollennachse.

Zum Übergang auf eine einen Boden verdichtende Rolle (Bandage) wird der Boden als die oben beschriebene zweite Rolle angenommen, wobei dann hier der Radius $R_2 = \infty$ gesetzt wird. Ferner ist der Elastizitätsmodul E_1 der ersten Rolle bedeutend größer als derjenige E_2 des Bodens. Es gilt somit

$$E_1 \gg E_2.$$

Im Verhältnis zu E_2 kann somit $E_1 \rightarrow \infty$ gesetzt werden.

Die auf die erste Rolle wirkende Kraft P ist bei einer Bodenverdichtungsvorrichtung eine Funktion der Zeit. Sie ist zeitlich nicht konstant. Die Kraft P ist identisch mit der Bodenreaktionskraft F in den Gleichungen [6], [7] und [8]. Die zeitliche Mittelung über die Kraft P während einer Umdrehung der Bandage 3 ergibt

$$\frac{1}{T} = \int_0^T P \cdot dt = (m_f + m_d) \cdot g \quad [11]$$

Es wird somit in Gleichung [10] $P = (m_f + m_d) \cdot g$ gesetzt. Gleichung [10] nach b aufgelöst ergibt dann

$$b \text{ [m]} = \left[\frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2} \cdot \frac{R_1 (m_f + m_d) \cdot g}{L} \right]^{1/2} \quad [12]$$

μ_2 und E_2 sind die Querkontraktion und der Elastizitätsmodul des Bodens.

5 Aufgrund des Elastizität des Bodens E_2 erfolgt bei Aufbringen der Kraft P eine Annäherung des Mittelpunkts der ersten Rolle an die Bodenoberfläche. Diese Annäherung δ ergibt sich zu

$$10 \quad \delta [m] = \frac{P}{L} \cdot \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \cdot \Theta(b/L) \quad [13]$$

Da die Breite der Auflagefläche ($L \cdot b$) bedeutend kleiner ist als deren Länge L ($b \ll L$) gilt

$$15 \quad \Theta(b/L) \approx \frac{2}{\pi} \cdot [1,89 + \ln(L/b)]$$

20 Es gilt ferner (Federgleichung)

$$F = c_B \cdot \delta$$

25 und somit

$$c_B = \frac{F}{\delta} \equiv \frac{P}{\delta} = \frac{L \cdot E_2}{(1-\mu_2^2) \cdot \Theta(b/L)} \quad [14]$$

30 Hieraus folgt

$$35 \quad E_2 = \frac{(1-\mu_2^2)}{L} \cdot \Theta(b/L) \cdot c_B \quad [15]$$

Es wird nun der obige Wert für b eingesetzt

$$40 \quad \Theta(b/L) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[1,89 + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\pi \cdot E_2 \cdot L^3}{16(1-\mu_2^2) \cdot R_1 \cdot (m_f + m_d) \cdot g} \right] \right] \quad [16]$$

Wird Gleichung [16] in Gleichung [15] eingesetzt, ergibt

sich die obengenannte Gleichung [3], wobei $R_1 = R$ ist.

Für eine optimale Verdichtung müssen die zu verdichtenden Bodenbereiche von der Walze 1 öfters überfahren werden.

- 5 Da es sich in der Regel um einen nicht vorverdichteten Boden handelt, wird in einer ersten bzw. nachfolgenden Verdichtungsüberfahrten maximal verdichtet.

- Das Einstellen einer optimalen Unwuchtkreisfrequenz Ω sowie eines optimalen statischen Unwuchtmoments wird anhand von Figur 7 erläutert, wobei hier analog zu Figur 4 die normierte Unwuchtkreisfrequenz $\Omega [\Omega/w_0]$ als Abszissenwert und die normierte maximale Amplitude $a [a/a_0]$ der Unwucht 5 als Ordinatenwert aufgetragen ist. Zum Start einer Bodenverdichtung weist die Unwucht 5 einen minimalen Abstand r_{u0} zur Drehachse 7 auf [statisches Unwuchtmoment $m_u \cdot r_{u0}$]. Die Umlaufkreisfrequenz Ω der Unwucht 5 wird ausgehend vom Stillstand auf einen Wert Ω_0 erhöht, der oberhalb der Resonanz des oben erwähnten Bodenverdichtungssystems liegt. Die jeweilige Verfahrensgeschwindigkeit v der Walze 1 wird gemäß den obengenannten Ausführungen an die Umlauffrequenz f der Unwucht 5 angepaßt. Die Abhängigkeit der Amplitude a der Bandage 3 von der Umlaufkreisfrequenz Ω erfolgt gemäß Kurve 43a. Im Punkt 45 liegt die Resonanz des Bodenverdichtungssystems. Dieser Resonanzpunkt wird aus den oben ausgeführten Toleranzgründen überschritten bis der Phasenwinkel ϕ zwischen Bandagenschwingung und Unwuchtschwingung etwa 100° beträgt [Punkt 47]. In einem nächsten Schritt wird das statische Unwuchtmoment durch Vergrößerung des radialen Abstands r_{u0} auf r_{u1} vergrößert [$m_u \cdot r_{u1}$]. Durch die Vergrößerung des statischen Unwuchtmoments bei gleicher Unwuchtumlauffrequenz f erhöht sich der Phasenwinkel ϕ auf einen Wert größer 100° , wie sich aus dem Abstand des neuen Einstellungspunktes 50 von der Resonanzkurve 49 (analog zu Kurve 27 in Figur 4) erkennen läßt. Es wird nun in einem nächsten Schritt die Umlaufkreisfrequenz der Unwucht 5 bei konstantem statischen Unwuchtmoment [$m_u \cdot r_{u1}$] von Ω_0 auf Ω_1 erniedrigt bis der Phasenwinkel ϕ wieder nur noch 100° beträgt. Radia-

ler Abstand r_u und Umlaufkreisfrequenz Ω werden nun abwechselnd geändert bis die Walze 1 zu springen beginnt. Dieses "Springen" ist gemäß obigen Ausführungen am Auftreten von ungeraden Vielfachen der halben Unwuchtumlauffrequenz erkennbar [Überschreiten der Kurve 52]. Das statische Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ wird erniedrigt um den stabilen Kurvenpunkt 51 zu erreichen. Es könnte auch die Unwuchtkreisfrequenz Ω verringert werden, jedoch ist dieses Einstellungsverfahren schwer zu handhaben, da sich hierbei zwei Werte, nämlich die Kreisfrequenz Ω und das Trägheitsmoment ändern. Die zum Kurvenpunkt 51 gehörenden Maschinenparameter definieren einen Zustand, in dem maximale Verdichtungsarbeit erbracht wird. Die Kurve 53 in Figur 7 gibt die optimale Einstellkurve wieder, welche immer einen Phasenwinkel ϕ von 100° gewährleistet.

Nach ersten Überfahrten, solange sich der Boden noch plastisch verhält, wird mit maximaler Verdichtungsleistung gearbeitet. Das plastische Verhalten ergibt sich aus den ermittelten Meßwerten. Im "plastischen Bereich" läßt sich die Bodensteifigkeit c_B nur näherungsweise ermitteln. Wohl wissend, daß bei einem noch plastischen Untergrund die Bestimmung des Bodenelastizitätsmoduls mit einem Fehler behaftet wird, wird er gemäß obigen Ausführungen berechnet. Bei Erreichen von etwa 90% des geforderten Bodenelastizitätswerts ist der plastische Bereich überschritten und die Steuerung stellt mit dem obengenannten Berechnungsverfahren das statische Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ und die Unwuchtumlauffrequenz f (Unwuchtumlaufkreisfrequenz Ω) derart ein, daß ein vorgegebener Bodenelastizitätsmodul E erreicht wird. Unter Verwendung der Formeln [3] und [5] kann von der Recheneinheit 12 während des Verdichtungsvorgangs der jeweils bereits erreichte Bodenelastizitätsmodul E bestimmt, und aus diesen Werten dann für den weiteren Verdichtungsvorgang die betreffenden Maschinenparameter, als da sind statisches Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$, Unwuchtfrequenz f und Verfahrensgeschwindigkeit v , eingestellt werden. Die Einstellung erfolgt während des Verfahrens. Die Einstellung der Verfahrensgeschwindigkeit v ist

problemlos schnell durchführbar. Um jedoch das statische Unwuchtmoment $m_u \cdot r_u$ im Sekundenbruchteilbereich auf einen vorgegebenen ermittelten Wert einzustellen, wird beispielsweise, wie unten ausgeführt ist, vorgegangen.

5

Anstatt, wie oben ausgeführt, den radialen Abstand r_u der Unwuchtmasse zu verändern, können zwei gleichsinnig umlaufende Unwuchten 56 und 64 verwendet werden, deren gegenseitiger radialer Abstand über ein Planetengetriebe eingestellt wird. Beträgt der radiale Abstand 180° , so ist der effektive gesamte Unwuchtwert null. Bei 0° ist der Unwuchtwert maximal. Durch Winkelwerte zwischen 0° und 180° sind sämtliche Zwischenwerte zwischen keiner und maximaler Unwuchtmasse einstellbar.

15

Das in Figur 8 schematisch dargestellte Planetengetriebe 53 dient zum Antrieb zweier gleichsinnig umlaufender Unwuchten 56 und 64, deren gegenseitige Lage zum Einstellen des statischen Unwuchtmoments $m_u \cdot r_u$ verstellbar ist. Im Gegensatz zu den obigen Ausführungen wird nun nicht mehr der radiale Abstand r_u einer punktförmig gedachten Exzentermasse, sondern bei gleichem radialen Abstand r_u die effektive Unwuchtmasse m_u eingestellt. Die Einstellungen gemäß Figur 7 erfolgen dann ausgehend von $[\Omega_0, m_{u0} \cdot r_{u0}]$ im Kurvenpunkt 47 für die nachfolgenden Kurvenpunkte mit $[\Omega_0, m_{u1} \cdot r_{u0}]$ statt $[\Omega_0, m_u \cdot r_{u1}]$ im Einstellpunkt 50, mit $[\Omega_1, m_{u1} \cdot r_{u0}]$ statt $[\Omega_1, m_u \cdot r_{u1}]$, $[\Omega_1, m_{u2} \cdot r_{u0}]$ statt $[\Omega_1, m_u \cdot r_{u2}]$ usw. Mit dem in Figur 8 dargestellten Planetengetriebe 53 ist eine Unwuchtmassenumstellung in Bruchteilen einer Sekunde möglich.

30

Das in Figur 8 gezeigte Planetengetriebe 53 wird von einem Antrieb 54 über eine Welle 55 angetrieben, welche direkt ohne jegliches Zwischengetriebe auf die eine Unwucht 56 wirkt. Auf der Welle 55 ist eine Zahnriemenscheibe 57 angeordnet, welche über einen Zahnriemen 59 auf eine Zahnriemenscheibe 60 wirkt. Die Zahnriemenscheibe 60 ihrerseits wirkt mit einem Getriebeteil 61 zusammen. Der Getriebeteil 61 hat drei miteinander kämmende Zahnräder 63a, 63b und 63c, wobei

35

das Zahnrad 63a mit der Zahnriemenscheibe 60 drehfest verbunden ist. Die Achse des Zahnrads 63b ist radial zur Drehachse des Zahnrads 63a verdrehbar. Der Verdrehwinkel ist ein Maß für die radiale Verdrehung der beiden Unwuchten 56 und 64 und damit ein Maß für die effektive gesamte Unwuchtmasse bzw. des effektiven statischen Unwuchtmoments $m_{u0} \cdot r_u$ bis $m_{u3} \cdot r_u$. Auf der Achse 65 des Zahnrads 63c sitzt ein Zahnrad 66, welches mit einem auf einer Hohlwelle 67 sitzenden Zahnrad 69 kämmt. Die Hohlwelle 67 wirkt mit der zweiten Unwucht 64 zusammen.

Da eine der beiden Unwuchten 56 und 66 direkt angetrieben wird und nur die Unwucht 64 durch das Planetengetriebe 53, hat dieses nur die Hälfte des Drehmoments zu übertragen. Als Referenzpunkt für die Bestimmung des Phasenwinkels ϕ gilt die Winkelhalbierende zwischen den Schwerpunkten der beiden Unwuchten 56 und 64.

Anstatt beide Unwuchten gleichsinnig mit ein- und derselben Umlauffrequenz Ω umlaufen zu lassen, kann auch eine der beiden Unwuchten durch entsprechende Auswahl der Zahnriemenscheiben 57 und 60 und/oder der Zahnräder 66 und 69 mit der doppelten Umlauffrequenz umlaufen.

Das oben beschriebene Getriebe, wie es in Figur 8 gezeigt ist, kann auch durch gleichwirkende, aber anders aufgebaute Überlagerungsgetriebe ersetzt werden. Gute Ergebnisse wurden beispielsweise mit einem sog. "Harmonic Drive Getriebe" erzielt, welches mit nur drei Bauteilen ["Wave Generator", "Circular Spline", "Flexspline"] hohe einstufige Untersetzungen erreicht. In diesem Getriebe ist der "Circular Spline" ein starrer Stahlring mit einer Innenverzahnung, die sich mit der Außenverzahnung des "Flexsplines" im Bereich der großen Ellipsenachse des "Wave Generators" im Eingriff befindet. Der "Flexspline" ist eine elastisch verformbare, dünnwandige Stahlbüchse mit einer Außenverzahnung, die einen kleineren Teilkreisdurchmesser als der "Circular Spline" hat und dadurch beispielsweise zwei Zähne weniger

über den Gesamtumfang besitzt. Der "Wave Generator" ist eine elliptische Scheibe mit aufgezogenem Dünnringkugellager, der in den "Flexspine" eingeschoben ist und ihn elliptisch verformt. Während der Drehung des "Wave Generators" bewegt sich
 5 der Zahneingriffsbereich mit der großen Ellipsenachse. Nach einer Drehung des "Wave Generators" um 180° vollzieht sich eine Relativbewegung zwischen "Flexspline" und "Circular Spline" um einen Zahn. Nach jeder vollständigen Umdrehung des "Wave Generators" dreht sich der "Flexspline" als Ab-
 10 triebselement genau um zwei Zähne entgegengesetzt zum Antrieb. Der mechanische Aufbau unter Verwendung dieses Getriebes ist äußerst kompakt.

Soll auf einer Baustelle Einbaumaterial verdichtet werden, so empfiehlt es sich, vor Einbringen des Verdichtungsguts die Steifigkeit c_B des Untergrunds mittels einer Überfahrt zu ermitteln bzw. zu prüfen. Selbstverständlich kann auch der Bodenelastizitätsmodul E ermittelt werden. Ist nämlich eine Schwachstelle im Untergrund bereits vorhanden,
 20 kann das Einbaugut nicht im geforderten Maß verdichtet werden.

Statt umlaufende Unwuchten zu verwenden, können auch vertikal schwingende Unwuchten, ausgebildet als Kolben-Zylindereinheiten, verwendet werden. Zum Verdichten können
 25 Bandagen über den Boden 20 gerollt werden; es kann aber auch eine vibrierende Platte über den Boden 20 verschoben werden.

Die erfindungsgemäße Meßvorrichtung unterscheidet sich
 30 von der erfindungsgemäßen Bodenverdichtungs-
 vorrichtung lediglich dadurch, daß die auf den Boden einwirkende und mit ihm zusammen ein Schwingungssystem bildende Einrichtung gegenüber der Verdichtungseinrichtung der Bodenverdichtungs-
 35 vorrichtung keine wesentliche Bodenverdichtung hervorruft. D.h. die auf den Boden einwirkende Kraft wird bei der Messung reduziert. Auch wird in der Regel bei der Messung die Masse der schwingenden Kraft kleiner gewählt. Die erfindungsgemäße Meßvorrichtung kann mit bekannten Verdichtungs-

-21-

vorrichtung zusammengebaut werden, um auch mit diesen Maschinen eine verbesserte Bodenverdichtung zu erzeugen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung mechanischer Daten eines verdichteten oder zu verdichtenden Bodens mit einer auf den Boden (20) einwirkenden Einrichtung (3a, 3b), welche zusammen mit dem Boden (20) schwingungsmäßig als ein einziges Schwingungssystem von einer Recheneinheit (12) erfaßt wird und durch eine schwingungsanregende Kraft derart angeregt wird, daß dieses Schwingungssystem in Resonanz schwingt oder mit einer die Resonanz um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellungsstabilitäten bestimmten Frequenzwert überschreitenden Frequenz (Ω) schwingt, wobei der Wert der schwingungsanregenden Kraft, deren periodische Frequenz (Ω) und deren Phasenwinkel (ϕ) zur Schwingung des Schwingungssystems selbsttätig von der Recheneinheit (12) derart eingestellt werden, daß unter Berücksichtigung der Masse (m_d) der auf den Boden einwirkenden Einrichtung (3a, 3b) und des auf ihr statisch lastenden Gewichts (m_f) die Bodensteifigkeit (c_B) und/oder der Elastizitätsmodul (E) des Bodens (20) ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ermittlung der Schwingungsauslenkung (a) des Schwingungssystems die Bewegung der Einrichtung (3a, 3b) in Richtung des geforderten Meßvektors insbesondere mit einem Beschleunigungsmesser (11) ermittelt wird, der Phasenwinkel (ϕ) auf bevorzugt zwischen 95° und 110° vor-eilend eingestellt wird und vorzugsweise die schwingungsanregende Kraft mit einer beschleunigten, insbesondere rotierenden Masse erzeugt wird, deren statisches Unwuchtmoment ($m_u \cdot r_u$) von der Recheneinheit (12) vorgegeben wird.
3. Verdichtungsverfahren zum Erreichen einer optimalen, insbesondere homogenen Bodenverdichtung (1) unter Verwendung des Meßverfahrens nach Anspruch 1 oder 2 mit ei-

- ner auf den zu verdichtenden Boden (20) einwirkenden Verdichtungseinrichtung (3a, 3b), welche zusammen mit dem Boden (20) schwingungsmäßig als ein einziges Verdichtungsschwingungssystem von einer Recheneinheit (12) 5 erfaßt wird und durch eine schwingungsanregende Kraft derart angeregt wird, daß dieses Verdichtungsschwingungssystem in Resonanz schwingt oder mit einer die Resonanz um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellungsstabilitäten bestimmten Frequenzwert überschreiten- 10 den Frequenz (Ω) schwingt, wobei der Wert der schwingungsanregenden Kraft, deren periodische Frequenz (Ω) und deren Phasenwinkel (ϕ) zur Schwingung des Verdichtungsschwingungssystems selbsttätig von der Recheneinheit (12) derart eingestellt werden, daß unter Berücksichtigung der Masse (m_d) der Verdichtungseinrichtung 15 (3a, 3b) und des auf ihr statisch lastenden Gewichts (m_f) eine vorgegebene Bodensteifigkeit (c_B) erreicht wird.
- 20 4. Verdichtungsverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ermittlung der Schwingungsauslenkung (a) des Verdichtungsschwingungssystems die Bewegung der Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) in Richtung des geforderten Verdichtungsvektors insbesondere mit einem Be- 25 beschleunigungsmesser (11) ermittelt wird, der Phasenwinkel (ϕ) auf bevorzugt zwischen 95° und 110° voreilend eingestellt wird und vorzugsweise die schwingungsanregende Kraft mit einer beschleunigten, insbesondere rotierenden Masse erzeugt wird, deren statisches Unwuchtmoment ($m_u \cdot r_u$) von der Recheneinheit (12) vorgegeben 30 wird.
- 35 5. Verdichtungsverfahren insbesondere nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Verdichtungs Vorgang beendet wird, sobald ein vorgegebener Elastizitätsmodul (E) des Bodens (20) von der Recheneinheit (12) selbsttätig ermittelt wird, wobei der Elastizitätsmodul (E) während des Überfahrens mit einer iterativen Berechnung

insbesondere unter zusätzlicher Verwendung der Bodensteifigkeit (c_B) und der Schwingungsamplitude (a) der Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) bzw. deren Beschleunigung (\ddot{a}) ermittelt wird.

- 5
6. Verdichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das unverdichtete Bodenmaterial in einem ersten Verdichtungsverfahren, bevorzugt in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit und des Verdichtungs Zustands mit maximaler, lediglich durch die Maschineneigenschaften begrenzter Verdichtungsleistung verdichtet wird, wobei insbesondere die schwingungsanregende Kraft selbsttätig jedoch nur so hoch eingestellt wird, daß kein Springen der Bodenverdichtungs Vorrichtung (1) erfolgt und vorzugsweise das Springen der Bodenverdichtungs Vorrichtung (1) durch eine Frequenzanalyse der Schwingung der Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) auf ein Auftreten einer halben Schwingungsteilkomponente zur Grundschiwingung und/oder durch einen Amplitudenvergleich aufeinanderfolgender Schwingungen der Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) bis zu einem vorgegebenen Abweichungswert ermittelt wird.
- 10
- 15
- 20
- 25 7. Verdichtungsverfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) über einen bereits auf einen vorgegebenen Wert verdichteten Boden (20) schneller als über noch zu verdichtenden Boden (20), bevorzugt mit reduzierter schwingungsanregender Kraft gefahren wird, um aus Sicht des Verdichtungsprozesses überflüssige Überfahrten zu minimieren.
- 30
- 35 8. Meß Vorrichtung (1) zur Messung mechanischer Daten eines verdichteten oder zu verdichtenden Bodens (20) mit einem Meßverfahren nach Anspruch 1 oder 2 mit wenigstens einer mit dem Boden (20) wenigstens zeitweise in Kontakt befindlichen Einrichtung (3a, 3b), wenigstens einer auf diese einwirkende, in Meßrichtung eine periodische Kraft

- erzeugende, schwingende Masse (5), deren Schwingungsfrequenz (Ω) durch einen Antrieb (54) einstellbar ist, einem Meßelement (11), insbesondere einem Beschleunigungsaufnehmer (11), welches den Zeitpunkt der maximalen Schwingungsamplitude (a_0) der Einrichtung (3a, 3b) in Meßrichtung feststellt, einem Sensor (29), der den Zeitpunkt der maximalen Schwingungsamplitude in Bodenverdichtungsrichtung der schwingenden Masse (5) bestimmt, einer Vergleichereinrichtung (12), welche den Phasenabstand (ϕ) der beiden Schwingungsmaxima ermittelt, einer Regeleinheit (12), mit der die Schwingungsfrequenz (Ω) der schwingenden Masse (5) über den Antrieb (54) einstellbar ist, bis mit der Vergleichereinrichtung (12) ein vorgegebener Phasenabstand, bevorzugt ein voreilender Phasenwinkel (ϕ) der anregenden Massenschwingung gegenüber der angeregten Einrichtungsschwingung zwischen 95° und 110° feststellbar ist, und einer mit einem Stellgeber (36) signalmäßig verbundenen Recheneinheit (12), mit der aus den mit dem Meßelement (11) und dem Sensor (29) ermittelten Daten sowie mechanischen Daten (m_f , m_d , $m_u \cdot r_u$) der Einrichtung (1) eine Bodensteifigkeit (c_B) und/oder ein Elastizitätsmodul (E) des Bodens (20) ermittelbar ist.
9. Meßvorrichtung (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die schwingende Masse (5) wenigstens eine umlaufende Unwucht hat, deren statisches Unwuchtmoment ($m_u \cdot r_u$) von einer Stelleinrichtung (53) in Abhängigkeit des mit der Vergleichereinrichtung (12) ermittelten Phasenabstands (ϕ) einstellbar ist.
10. Meßvorrichtung (1) nach Anspruch 8 oder 9, gekennzeichnet durch eine Frequenzanalyseeinrichtung (12), welche die von der Einrichtung (3a, 3b) infolge der anregenden Schwingung (Ω) der schwingenden Masse (5) angeregte Schwingung auf halbe Schwingungsfrequenzanteile und Vielfache der anregenden Schwingung (Ω) analysiert und bei Auftreten dieser Schwingungsanteile die anregende

Schwingungsfrequenz (Ω) durch den Antrieb (54) erhöht und/oder das statische Unwuchtmoment ($m_u \cdot r_u$) der schwingenden Masse (5) über eine Stelleinrichtung (53) erniedrigt.

- 5
11. Bodenverdichtungs Vorrichtung (1) zur optimalen homogenen Bodenverdichtung mit einer Meßvorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 10 zur Durchführung eines Verdichtungsverfahrens nach einem der Ansprüche 3 bis 7 mit wenigstens einer mit dem zu verdichtenden Boden (20) wenigstens zeitweise in Kontakt befindlichen Verdichtungseinrichtung (3a, 3b), wenigstens einer auf diese einwirkende, in Bodenverdichtungsrichtung eine periodische Kraft erzeugende, schwingende Masse (5), deren Schwingungsfrequenz (Ω) durch einen Antrieb (54) einstellbar ist, einem Meßelement (11), insbesondere einem Beschleunigungsaufnehmer (11), welches den Zeitpunkt der maximalen Schwingungsamplitude (a_0) der Bodenverdichtungseinrichtung (Bandage) (3a, 3b) in Bodenverdichtungsrichtung feststellt, einem Sensor (29), der den Zeitpunkt der maximalen Schwingungsamplitude in Bodenverdichtungsrichtung der schwingenden Masse (5) bestimmt, einer Vergleichereinrichtung (12), welche den Phasenabstand (ϕ) der beiden Schwingungsmaxima ermittelt, einer Regeleinheit
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- (12), mit der die Schwingungsfrequenz (Ω) der schwingenden Masse (5) über den Antrieb (54) einstellbar ist, bis mit der Vergleichereinrichtung (12) ein vorgegebener Phasenabstand, bevorzugt ein voreilender Phasenwinkel (ϕ) der anregenden Massenschwingung gegenüber der angeregten Bodenverdichtungseinrichtungsschwingung zwischen 95° und 110° feststellbar ist, und einer mit einem Stellgeber (36) signalmäßig verbundenen Recheneinheit (12), mit der aus den mit dem Meßelement (11) und dem Sensor (29) ermittelten Daten sowie mechanischen Daten (m_f , m_d , $m_u \cdot r_u$) der Bodenverdichtungseinrichtung (1) eine Bodensteifigkeit (c_B) des gerade verdichteten Bodens (20) ermittelbar ist, und insbesondere die Frequenz (Ω) und die periodische Kraft mit dem Stellge-

ber (36) zum Erreichen einer vorgegebenen Bodensteifigkeit (c_B) einstellbar sind.

- 5 12. Vorrichtung (1) nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die schwingende Masse (5) wenigstens eine umlaufende Unwucht hat, deren statisches Unwuchtmoment ($m_U \cdot r_U$) von einer Stelleinrichtung (53) in Abhängigkeit des mit der Vergleichereinrichtung (12) ermittelten Phasenabstands (ϕ) einstellbar ist.
- 10 13. Vorrichtung (1) nach Anspruch 11 oder 12, gekennzeichnet durch eine Frequenzanalyseeinrichtung (12), welche die von der Verdichtungseinrichtung (3a, 3b) infolge der anregenden Schwingung (Ω) der schwingenden Masse (5) angeregte Schwingung auf halbe Schwingungsanteile und Vielfache der anregenden Schwingung (Ω) analysiert und bei Auftreten dieser Schwingungsanteile die anregende Schwingungsfrequenz (Ω) durch den Antrieb (54) erhöht und/oder das statische Unwuchtmoment ($m_U \cdot r_U$) der schwingenden Masse (5) über eine Stelleinrichtung (53) erniedrigt.
- 15 20 14. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die schwingende Masse (5) aus zwei gleichsinnig umlaufenden Teilmassen (56, 64) besteht, welche über ein Planetengetriebe (53) antreibbar und in ihrer Lage zueinander einstellbar sind.
- 25

Zusammenfassung

Bei dem Verfahren zum Erreichen einer optimalen, insbesondere homogenen Bodenverdichtung wird eine auf den zu verdichtenden Boden einwirkende Verdichtungseinrichtung (3), welche zusammen mit dem Boden schwingungsmäßig als ein einziges Verdichtungsschwingungssystem von einer Recheneinheit (12) erfaßt wird, durch eine schwingungsanregende Kraft derart angeregt, daß dieses Verdichtungsschwingungssystem in Resonanz schwingt oder mit einer die Resonanz um einen vorgegebenen, lediglich von Einstellungsstabilitäten bestimmten Frequenzwert überschreitenden Frequenz (Ω) schwingt. Der Wert der schwingungsanregenden Kraft, deren periodische Frequenz (Ω) und deren Phasenwinkel (ϕ) zur Schwingung des Verdichtungsschwingungssystems werden selbsttätig von der Recheneinheit (12) derart eingestellt, daß unter Berücksichtigung der Masse der Verdichtungseinrichtung (3) und des auf ihr statisch lastenden Gewichts eine vorgegebene Bodensteifigkeit erreicht wird.

Die erfindungsgemäße Verdichtungseinrichtung kann auch zur Bestimmung der Bodensteifigkeit und/oder des Elastizitätsmoduls des Bodens verwendet werden.

(Fig. 3)

2/3

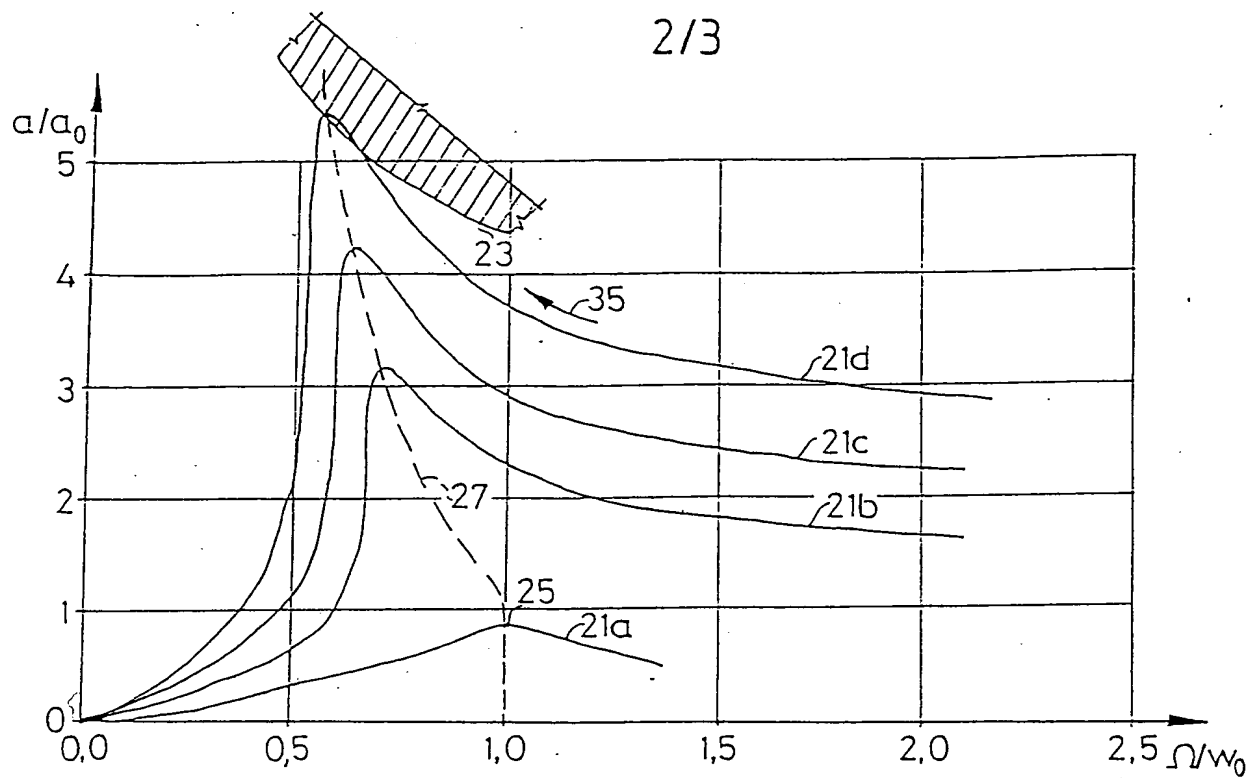


Fig. 4

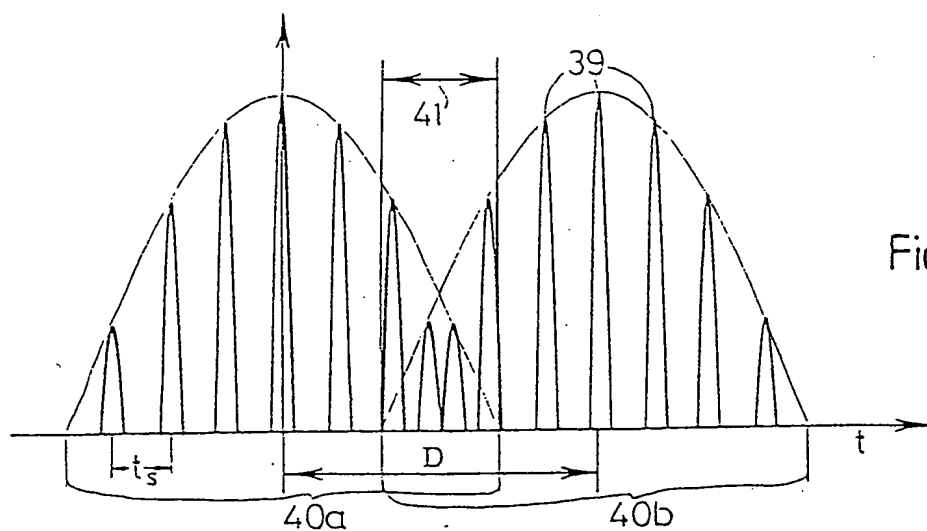


Fig. 6

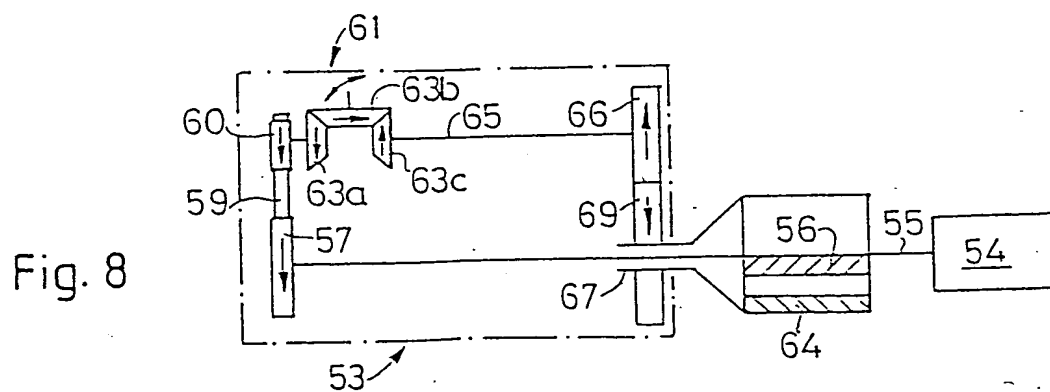


Fig. 8

3/3

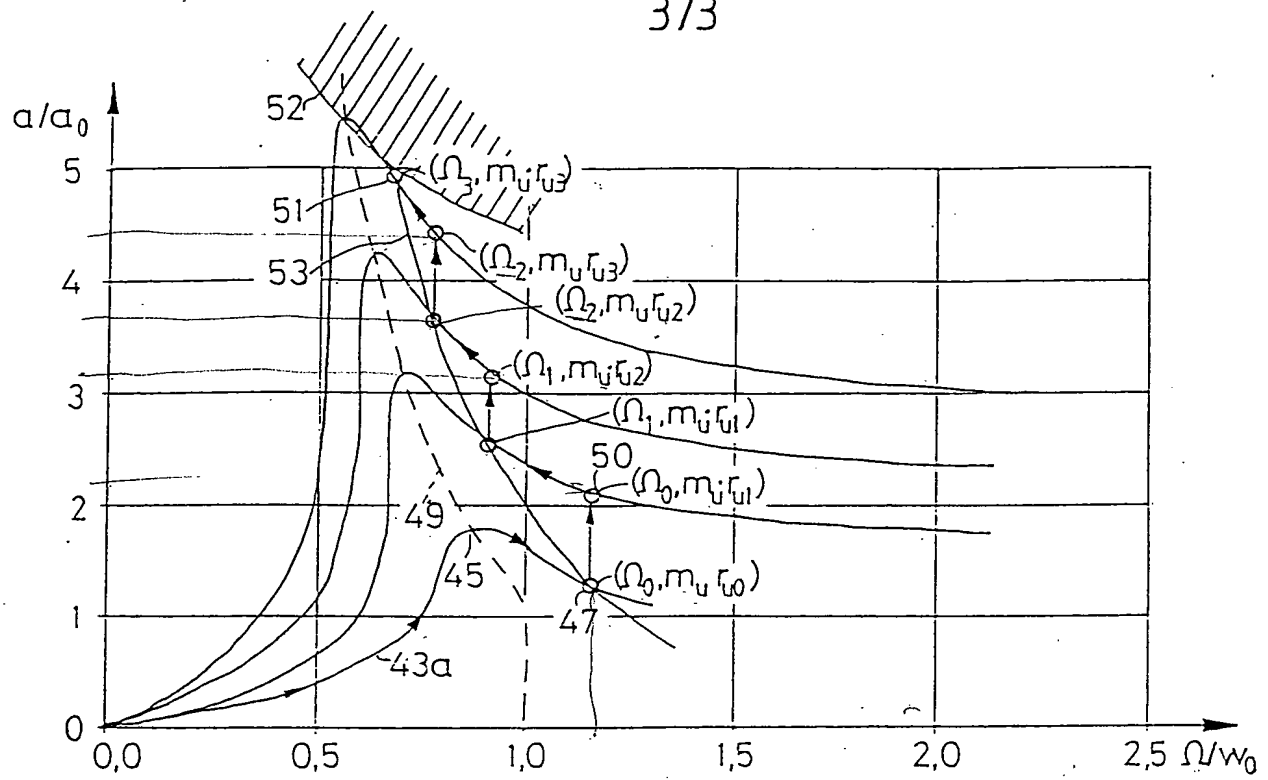


Fig. 7

r_{u0} minimal

